



TITLE:

# <大学の研究・動向> 電力変換技術 による工学・物理システムの制御 を目指して

AUTHOR(S):

引原, 隆士; 齋藤, 啓子; 佐藤, 宣夫; 薄, 良彦

---

CITATION:

引原, 隆士 ...[et al]. <大学の研究・動向> 電力変換技術による工学・物理システムの制御を目指して. Cue 2008, 20: 3-7

ISSUE DATE:

2008-09

URL:

<https://doi.org/10.14989/68925>

RIGHT:

## 大学の研究・動向

# 電力変換技術による工学・物理システムの制御を目指して

工学研究科 電気工学専攻 電気エネルギー工学講座 電力変換制御工学分野

教授 引 原 隆 士

hikihara@kuee.kyoto-u.ac.jp

助教 齋 藤 啓 子

keiko@kuee.kyoto-u.ac.jp

助教 佐 藤 宣 夫

n-satoh@kuee.kyoto-u.ac.jp

助教 薄 良 彦

ysusuki@kuee.kyoto-u.ac.jp

## 1. 本研究室の概要

本研究室の分野名である「電力変換制御工学」では、パワーエレクトロニクスと呼ばれる電源・電力機器に関わる回路・システム技術やモーターなどの電気機器の制御技術が従来からの研究対象である。本研究室では、上記の所謂電力変換技術の観点から工学・物理における制御を追求することを目的として、制御対象であるシステムの力学の数理解析から制御系の設計・実装および実験まで幅広く進めている。具体的な制御としては電力システムのようなマクロレベルのシステム運用からマイクロ・ナノレベルの物理操作までを含み、新しいデバイスの物性を最大限引き出すための回路技術の開発なども率先して行っている。以下に現在の研究テーマを示す。

- A. パワーエレクトロニクス：SiCなどのワイドバンドギャップ半導体のデバイスモデルの構築からSiを越えた優位的物性の利用を可能にするドライブおよび回路実装技術の開発、電気自動車の開発研究
- B. 電磁機械およびMEMS (Micro-Electro-Mechanical Systems)：原子間力顕微鏡の力学と制御、マイクロ・アクチュエータや非接触アクチュエータの開発、マイクロ電気機械共振器の開発
- C. 電気エネルギーネットワーク：分散電源連系技術とマイクログリッドの開発研究、二次電池（レドックスフロー電池）の系統連系システムの開発
- D. 非線形システムの数理：時間遅れ系・分布系・ハミルトン系などの大域解析、同期・周波数引き込み現象などの解析、カオス振動の統計論

## 2. 電気エネルギーネットワークの力学

本紹介は紙面が限られていることもあり、マクロレベルの制御の研究対象である電力システムに特化し研究内容を詳述する。電力システムの研究は前述のC. およびD. に属するものであり、本研究室のテーマを全て網羅するものではない。本紹介の目的は、電力システムを通して、冒頭で述べた「制御対象であるシステムの力学の数理解析」を具体的に説明することにある。なお、電力システムの研究は大澤靖治教授の主宰されている電力システム分野研究室で進められており、本研究室では電力供給に関わるシステムの力学と電力変換制御を用いた要素技術について研究を進めてきた。以下では力学に関する研究成果を紹介する。

## 2-1. 同期運転の原理

交流送電ネットワークの動作原理は三相交流発電機の同期運転である。近年、電力システムを含めて物理・生物・工学システムに生起する同期現象に注目が集まっている。また、本電気系教室では電気電子回路に生起する同期現象が古くから研究されてきた [1、2]。電力の安定供給において、交流発電機の同期運転の原理を物理現象の観点から理解することは重要である。ここで交流発電機の同期運転は、従来の解析対象であったVan der Pol方程式のような自励振動系に関する同期現象と異なり、回転系のエネルギー結合に基づく同期現象である [3] との指摘がなされている。上記の指摘は示唆に富むものであるが、同期現象とシステムを構成する振動子のエネルギー変換・授受特性との関係は、本電気系教室の倉光正巳先生、高瀬冬人先生が提唱された平均ポテンシャルによる振動現象の解析 [4] を除いて残念ながら十分に検討されていない。倉光先生、高瀬先生の結果は同期現象を含む振動現象とシステムの損失パワーの関係をBryton-Moser方程式により解析的に記述する重要な結果である。また、電力工学では同期化力などの定量的概念を用いて同期運転が説明されてきた。しかしながら、上記概念は同期運転時のエネルギー変換特性の一条件に過ぎず同期運転の原理に関して知見を与えるものではない。本研究室では、同期運転の原理の理解に向けた第一歩として、Van der Pol方程式及びPLL方程式で記述される強制自励振動系のエネルギー変換特性と周波数引き込み現象との関係を検討した [9]。PLL方程式が表す自励振動は第二種周期解（自励回転運動に相当し、交流発電機の運動の一近似）で表され、振幅応答はVan der Pol方程式の場合と異なる特性を示す [5]。[9] では、振幅応答曲線の差異が強制自励振動系のエネルギー授受特性から説明可能であることを示した。本結果から、システムのエネルギー変換特性と周波数引き込み状態の安定性との関係が明らかになりつつある。現在は機械システムや生物システムに解析の対象を広げ、システムのエネルギーおよびパワー変換の観点から同期・周波数引き込み現象の検討を進めている。また、分散電源のインバータを用いた系統連系システムに関しても上述の同期運転の観点から検討を進めている [10]。

## 2-2. 故障波及防止の手法

電力システムに生起するダイナミクスと制御手法にはハイブリッド性を有するものが数多く知られている。重要な一例として、広域大停電を引き起こす故障波及のダイナミクスが挙げられる。2003年8月北米で発生した広域大停電は、電力の安定供給の重要性を我々に再認識させた出来事であり、大停電発生に関わる力学の解明と抑制手法の確立という重要な研究課題を提起した。大停電を引き起こすダイナミクスは極めて複雑であるため、本研究室では故障波及のダイナミクスのハイブリッド性という一側面に着目し上記課題に挑戦している [11-14]。ここで言うハイブリッド性とは、故障波及の時間発展を記述する数値モデルに周波数変化などを記述する連続値変数と送電ネットワークの不連続な構成変化を記述する離散値変数の両方が必要であることを意味している。連続値および離散値変数が混在したシステム（力学系）はハイブリッドシステムと呼ばれ、計算機科学と制御工学の融合した研究領域として注目を集めてきた。本研究室では、スイッチング回路におけるハイブリッドダイナミクスの解析 [6、7] の成果を生かし、発電機の電気機械的動揺と故障発生・故障箇所の除去・再開路というネットワークの構成変化の相互作用をハイブリッドオートマトンでモデル化し、故障発生時にシステムの安定性を評価する手法を提案した [11、12]。図1にその一例を示す。提案手法では、safety-critical（安全性が重大）なシステムの検証に用いられる可到達性解析を採用している。電力システムはsafety-criticalな大規模実システムであり、解析と制御の安全性の観点からの枠組みは将来の電気エネルギーネットワークの構築に向けて重要と考えられる。また、過渡不安定性の回避に向けた再開路操作の検討も行い、過渡不安定性の回避に向けた再開路操作の手順の決定において可到達性解析に基づく提案手法が有用であることを示した [13]。さらに2003年イタリアで発生した広域大停電

を対象に、故障波及のダイナミクスを記述するハイブリッドシステムを構築し故障波及を支配する力学の理解を目指すとともに、波及防止制御の可能性を検討している [14]。

### 2-3. 動揺不安定性の現象

最近、生体分子の構造変化や自己組織化に関わる力学の研究結果が報告された [8]。本研究室では上記を出発点として、過渡安定性解析モデルである多自由度動揺方程式系に大域不安定性が生じることを示した [15]。本不安定性は、従来十分に指摘されていない電力システムの力学を含むものである。図2に不安定性の一例を示す。重要な点の1つは、局所的な外乱に対して全ての同期機がほぼ同時に脱調に至る点である。これは、従来の脱調伝播シナリオ“ハイブリッドシステムに基づいて検討した故障波及の力学”と異なっており、従来のシステム運用では不安定性の回避が困難と考えられる。また、本不安定性が送電ネットワークと比較して小容量の発電施設および負荷が密集したシステム構成において発生する点も重要である。例えば、需要地に近くかつ分散電源などの小容量の発電施設を多数含むシステム構成が考えられる。このようなシステムの知見を提示することは、将来の電気エネルギーネットワークの構築に向けて重要と考えている。現在は、大域不安定性の伝播現象および抑制手法を検討している。

### 3. まとめ

以上、本研究室で得た電気エネルギーネットワークに関する研究成果を紹介した。本紹介は解析に関わる成果であるが、はじめに述べたように、本研究室の目的は工学・物理における制御あるいは設計にある。電力システムでは、対象自身が成熟しかつ実用に供されているものであるため、導入のコストや運用の安全性などを考えるとき、新規の電力機器を制御系として新たに導入することは必ずしも最適とはいえない。よって、既存の電力システムに対しては、与えられた制御の目的が現状のシステム構成と要素を用いてどこまで達成できるのかを明確にし、その目的の達成に向けて現状の要素をどのように活用すべきかを提案することが必要である。一方、本研究室で進めているマイクロ・ナノレベルの研究では、マイクロ・ナノデバイス自体を所望の機能を満足する様に設計することが可能であり、応用上重要である。

21世紀の技術はバイオ、ナノテクノロジー、エネルギー・環境分野で大きな進展を見せ、今後多くの成果が期待されている。これらを支えるのはエネルギー・電力を供給する技術と情報を操作する技術であり、電力変換制御工学の貢献が求められる対象である。同時に、我々はエネルギー・環境に関わる多くの課題に直面し、早急な取り組みが必要とされている。現在のエネルギー利用の多くが電気エネルギーを介していることをふまえるとき、電力変換制御工学は課題の解決に向けて積極的に技術を開発していく分野でもある。エネルギー・環境問題を含め我々が生み出してきた負の遺産を解消し、地球上で他の生物と共存していく方策を見つけ出すことは人類共通の課題であり、「システム」や「制御」という概念を積極的に活用してきた電気電子工学の一つの使命と考えている。

### 参考文献

- [1] C. Hayashi, Nonlinear Oscillations in Physical Systems (McGraw-Hill, 1964).
- [2] 上田 皖亮, カオス現象論 (コロナ社, 2008).
- [3] 高木 純一, 同期現象研究の歴史と今後の課題, 電気四学会連合大会講演論文集, vol. 6, 1974.
- [4] 倉光 正巳, 高瀬 冬人, 平均ポテンシャルを用いた多自由度発振器の解析法, 信学論A, vol. J66-A, no. 4, pp. 336-343, 1983.
- [5] Y. Susuki and Y. Ueda, Amplitude response curves of frequency-locked rotations, IEICE T. Fundamentals, vol. E90-A, no. 10, pp. 2250-2252, 2007.

- [ 6 ] 引原 隆士, パワーエレクトロニクスと非線形力学の接点, システム／制御／情報, vol. 41, no. 7, pp. 240-245, 1997.
- [ 7 ] 引原 隆士, スイッチング回路の非線形ダイナミクスとその解析, 計測と制御, vol. 44, no. 7, pp. 440-445, 2005.
- [ 8 ] I. Mezic, On the dynamics of molecular conformation, Proc. Nat. Acad. Sci. U.S.A., vol. 103, no. 20, pp. 7542-7547, 2006.

#### 本紹介に関する発表文献

- [ 9 ] Y. Susuki, Y. Yokoi, and T. Hikiyara, Energy-based analysis of frequency entrainment described by van der Pol and phase-locked loop equations, Chaos, vol. 17, article no. 023108, 2007. <http://hdl.handle.net/2433/49149>
- [10] T. Hikiyara, T. Sawada, and T. Funaki, Enhanced entrainment of synchronous inverters for distributed power sources, IEICE T. Fundamentals, vol. E90-A, no. 11, pp. 2516-2525, 2007.
- [11] 引原 隆士他, 電力系統解析へのハイブリッドシステム理論の適用 [I] - [V], 電気学会 全国大会, 徳島, 2005, 横浜, 2006.
- [12] 薄 良彦, 引原 隆士, 電力ネットワークのハイブリッドダイナミクス: モデル, 解析, 制御, システム／制御／情報, vol.51, no.11, pp.478-492, 2007. <http://hdl.handle.net/2433/48897>
- [13] 崎山 卓也, 植村 卓司, 越智 孝志, 薄 良彦, 引原 隆士, 可到達集合に基づく過渡安定性評価手法に関する検討—1 回線事故時における事故復旧方法の評価—, 電気学会 電力・エネルギー部門大会, 沖縄, 2006.
- [14] Y. Susuki, Y. Takatsuji, and T. Hikiyara, Hybrid dynamical system as model for cascading outage in a power system, 40th North American Power Symposium, Calgary, Canada, 2008 (発表予定).
- [15] Y. Susuki, I. Mezic, and T. Hikiyara, Global swing instability of multimachine power systems, 47th IEEE Conference on Decision and Control, Cancun, Mexico, 2008 (発表予定).

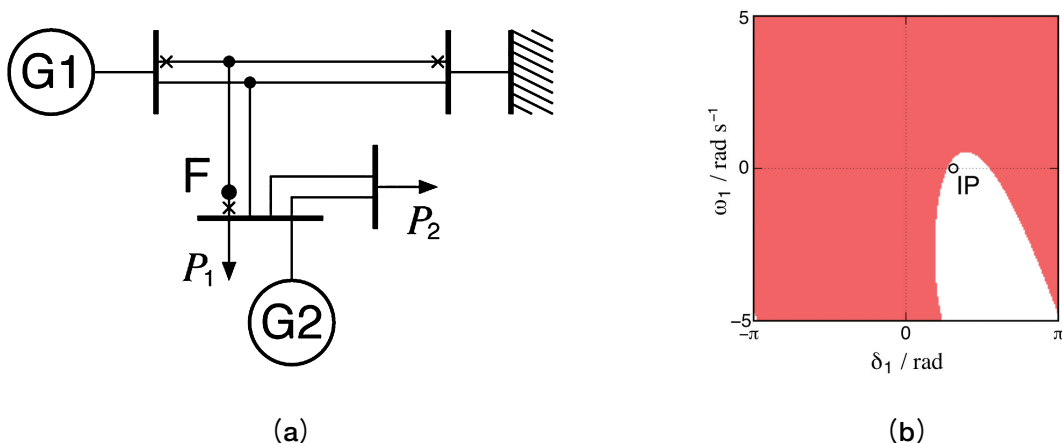
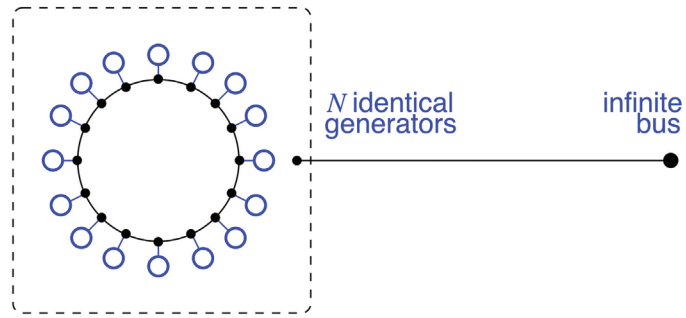
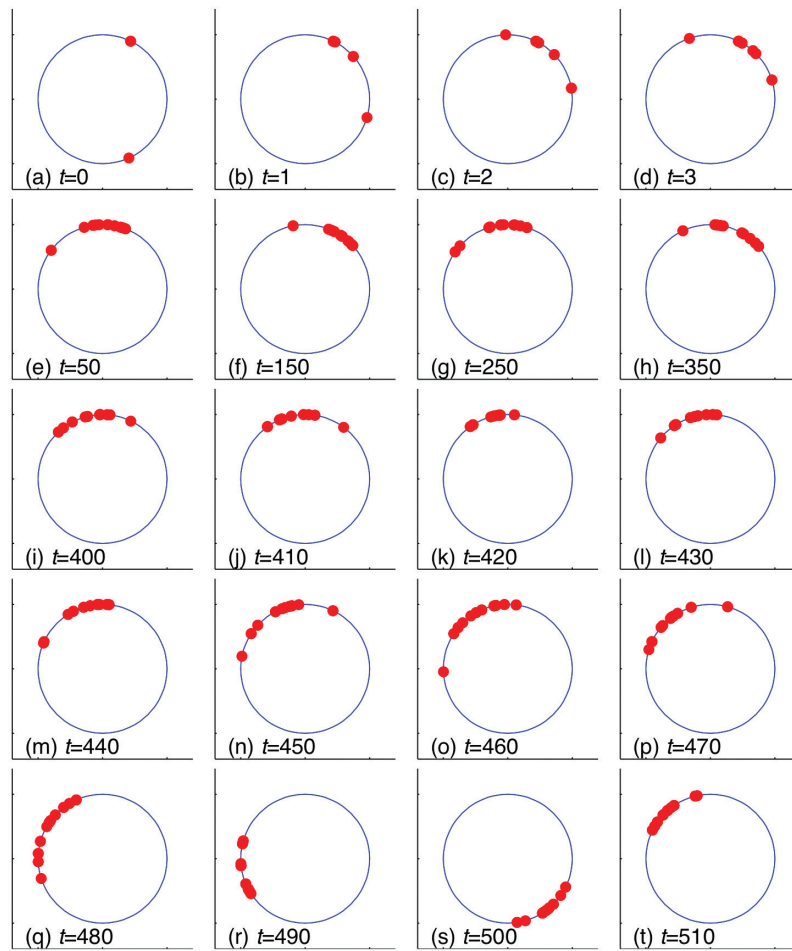


図 1 : 二機無限大母線系統(a)と可到達性解析に基づく二機脱調不可避領域の検討結果(b)を示す。運転中に(a)の点Fにおいて故障が発生し、故障回線を開放した場合を考える。(b)は発電機G1の故障発生時刻における動作点集合であり、赤色の領域がリレー操作を用いても二機脱調が不可避の動作点を表す。(b)の解析結果により故障発生時刻の発電機の動作状態を把握することにより将来の不安定性の可能性を判定できる。例えば、故障発生時刻に発電機G2がIPで示された通常動作点に存在するならば、二機脱調に至ることはない。[13] より転載。



(a)



(b)

図 2 :  $N=20$ 機の同期機を含むループ状電力システム(a)の電気機械的動揺の大域不安定性(b)を示す。(b)の赤点が同期機の動作点(無限大母線を基準とした相差角)を表す。ある同期機へ初期時刻に擾乱を加えると(b-a)、擾乱に伴い加えたエネルギーがネットワークを介して伝播し他の同期機の動揺を生み((b-b)~(b-d))、動揺がインコヒーレントに続いた((b-e)~(b-h))後、全ての同期機がほぼ同時刻に(コヒーレントに)無限大母線に対して脱調へ至る((b-i)~(b-t))。[17]より転載。